

わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究

Effects of Aspect Ratio on River Characteristics in Embayments

瀬津家久^{*}・鬼束幸樹^{**}・池谷和哉^{***}・高橋俊介^{****}

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA, Kazuya IKETANI and Shunsuke TAKAHASHI

^{*}正会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)^{**}正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学専攻(同上)^{***}正会員 工修 三井造船 (〒134-0088 東京都江戸川区西葛西8丁目4番6号 S T西葛西ビル)^{****}学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

There are several embayments so-called "Wando", which are located at riverbank and have dead zones, in Japanese natural rivers. The characteristics of water fluctuations and their frequency have been investigated to some extent. In contrast, turbulence measurements in and around embayments have not been conducted as yet. However, it is quite important to investigate the turbulent characteristics in and around embayments, because mass and momentum exchanges between the main channel and embayment are generated by the turbulence.

In this study, the turbulence measurements in and around embayments were conducted by making use of a two-component laser Doppler anemometer (LDA) and ultrasonic water-wave gages. The aspect ratio of the downstream length L and spanwise length of embayment B_w were changed widely. Further, the behavior of the coherent vortices was measured by Particle-image Velocimetry (PIV). Several new findings, such as the mass and momentum exchange rates were investigated experimentally.

Key Words : embayments, LDA, turbulence, coherent vortices

1. はじめに

近年、高度経済成長期に行った河川改修等によって河川環境が悪化した反省から、従来の治水や利水機能のみならず環境保全が河川事業に求められるようになった。中でも開口部を有する死水域「わんど」は多様な生態系を支える場として、河川環境を考慮に入れた水工設計論を展開する上で重要な要素となっている。

中川ら¹⁾は、わんどの形状、境界面の開口部長さおよび植生がわんど周辺に与える影響および低水時と高水時の特性を、流れの可視化により検討した。また電磁流速計による点計測により、渦の周期についても言及している。

水面変動特性に関して木村ら²⁾は、数値計算によってわんを解析し、渦とセイシュとの共鳴現象や、渦の下流端への衝突位置の規則的变化に起因する低周波変動の発生を再現した。また、実験との比較によりフルード数の違いによってセイシュの発生の有無が決定され、これが大規模渦の発生・発達に関与していること、せん断不安定の周期はフルード数が等しければ死水域のアスペクト比によらず一定であることを示唆した。一方、わんどの持つ重要な特性として挙げられる土砂の堆積に関して木村ら³⁾は、わんど周辺の浮遊砂輸送・堆積過程について水理実験と数値解析により検討を行い、堆積過程は4パターンに分類できるとした。さらにその堆積パターンは主流の摩擦速度と沈降速度の比および主流のフルード数に依存することを示して

いる。

このように、わんど周辺の流れは、主に可視化手法を用いてその組織渦構造についてはおおまかに解明されつつあるが、水理条件やわんどのアスペクト比を系統的に変化させた場合の乱流特性および組織渦構造との関わりについては、依然として不明な点が多い。そこで本研究においては、可視化実験を基礎知識とし、わんど流れにおいてアスペクト比を系統的に変化させた場合における乱流構造の変化に関して、LDA(Laser Doppler Anemometer)を用いて高精度に実験的解析を行う。そしてわんど流れの統計乱流構造の特性を把握する。また、今後数値計算に役立ち得る基礎データを集積し、わんど設計に貢献することを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

図-1に点計測で用いた実験装置を示す。水路は全長10m、幅 $B=40\text{cm}$ 、高さ 40cm の可変勾配型循環式直線水路である。この水路をアクリル製ボックスで仕切ることによりわんどが構成されている。主流部の幅については 25cm とした。座標系は流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上向きに y 軸を、水路横断方向に z 軸を設定し、水路床を $y=0$ 、わんど上流端を $z=0$ とした。

計測断面は水路上流端からおおよそ 5.8m の位置であり、十分に発達した乱流となっている。計測断面は半水深の位置である。計測断面における測定点のメッシュは、水路横断方向には主流部とわんど内部との境界

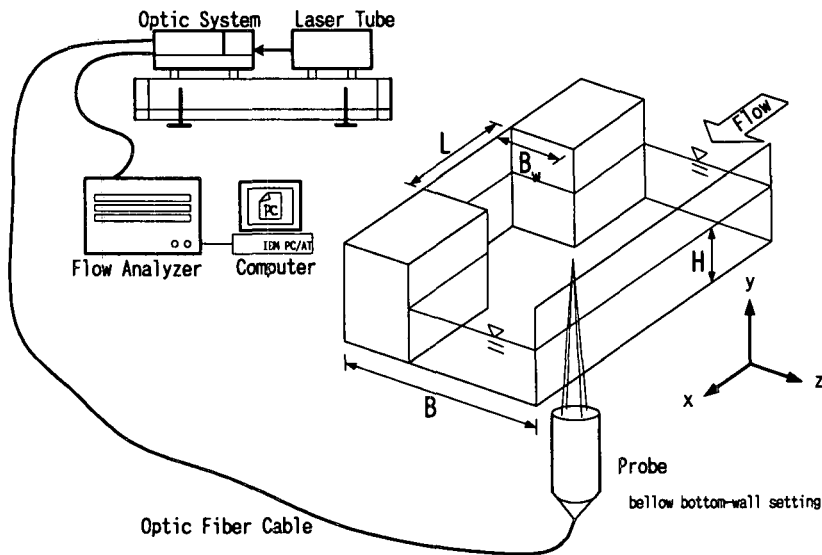


図-1 実験装置

表-1 水理条件

CASE	H (cm)	B_w (cm)	L (cm)	L/B_w	Q (l/s)	Fr
A03	4.00	5.00	15.0	3.0	3.0	0.49
A05	4.00	4.00	20.0	5.0	3.0	0.49
A10	4.00	2.00	20.0	10.0	3.0	0.49

Q : 流量、 H : 流入部平均水深、 B_w : わんど幅、 L : 開口部長さ

$$Fr = U_m / \sqrt{gH} \quad U_m: \text{流入部断面平均流速}$$

部を密にして不等分割している。これにより、各実験ケースごとに約 500~700 測点について計測を行った。

瞬間流速(u, w)の計測には DANTEC 社製の水冷 4 ビーム後方散乱型 2 成分アルゴンイオンファイバーレーザー流速計(LDA)を用い、水路底面から(u, w)を計測した。その際、光学プローブは水路と一体となったトラバースによって x, z 方向に移動させた。データのサンプリング時間は、1 測点について約 60sec であり、平均サンプリング周波数は約 200Hz であった。

表-1 に実験条件を記す。表中の H は流入部平均水深、 Q は流量、 $Fr = U_m / \sqrt{gH}$ はフルード数、 U_m は流入部断面平均流速、 B_w はわんど幅、 L はわんど開口部長さである。実験ケースは、アスペクト比(L/B_w)が 3.0、5.0、10.0 の 3 通りを設定し、各々 case A03、A05、A10 とした。

3. 平均流速の分布特性に関する実験結果および考察

3.1 流れ場の瞬間流特性

まず予備実験として行った PIV(Particle Image Velocimetry)による可視化実験結果を示す。図-2 は、瞬

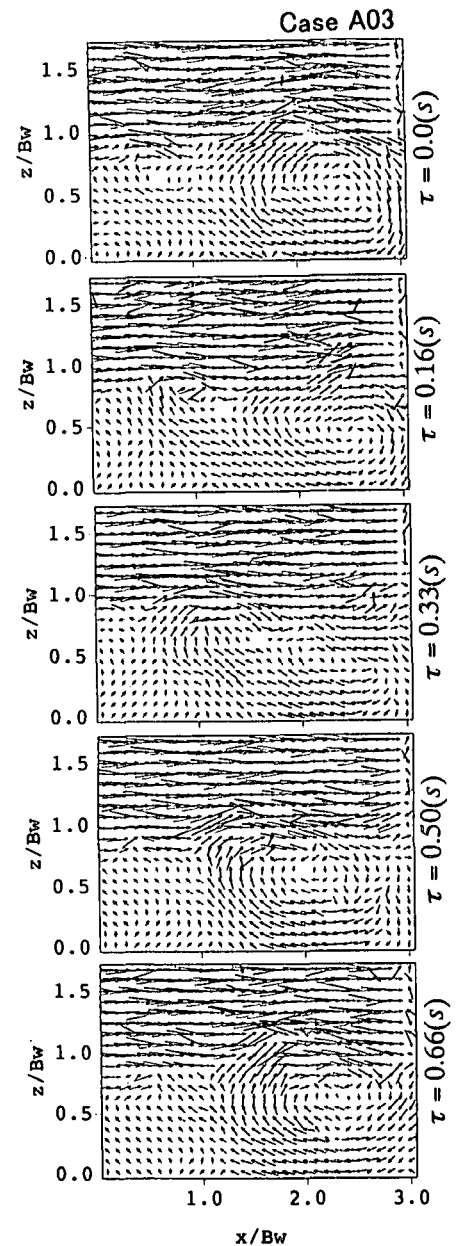


図-2(a) 瞬間流速ベクトル (case A03)

間流速ベクトル図 ((a): case A03、(b): case A05、(c): case A10) である。これより、case A03 では下流端に定常渦が存在し、その中心の移動距離は小さいことが分かる。しかし、上流端からの剥離渦と下流端の定常渦との合体現象ははっきりと見て取れる。case A05 ではわんど内部に複数の循環渦が確認でき、それらが流下しながら合体・分離現象を見せており、全ケース中、わんど内部での混合は最も活発である。case A10 では上流端に死水域が存在し、それは下流端までは影響を及ぼしていない。 $x/B_w = 4.0$ 付近で主流部からわんど内部に入り込んだ流体が、わんど下流端から再び主流部にでていく様子が確認される。

3.2 平均流速の分布特性

図-3 に LDA による長時間点計測によって得られた

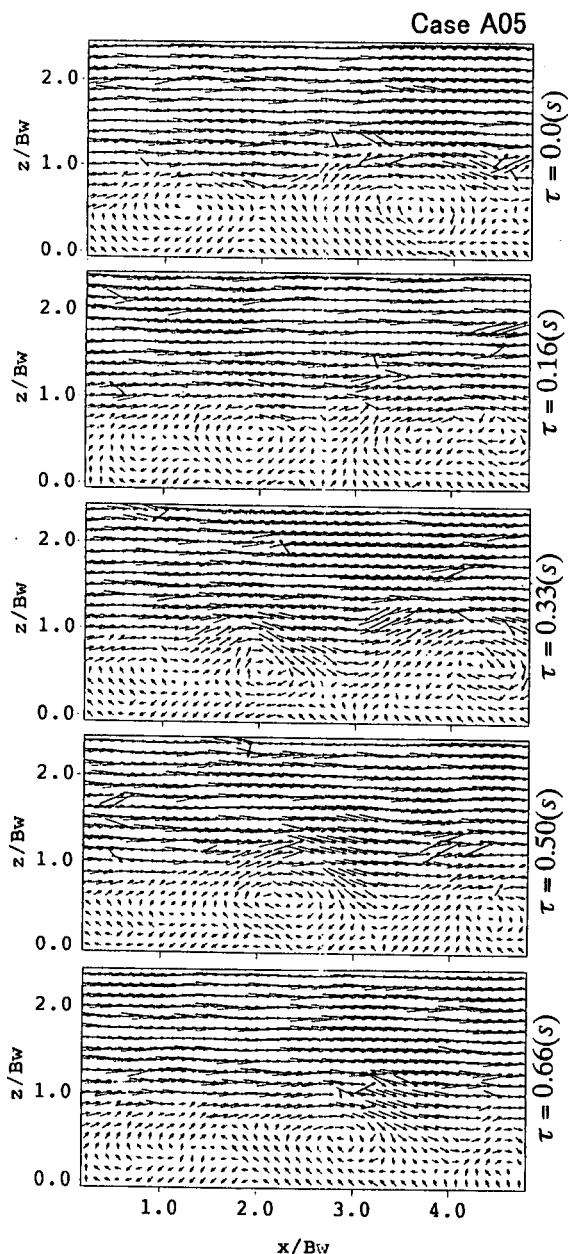


図-2(b) 瞬間流速ベクトル(caseA05)

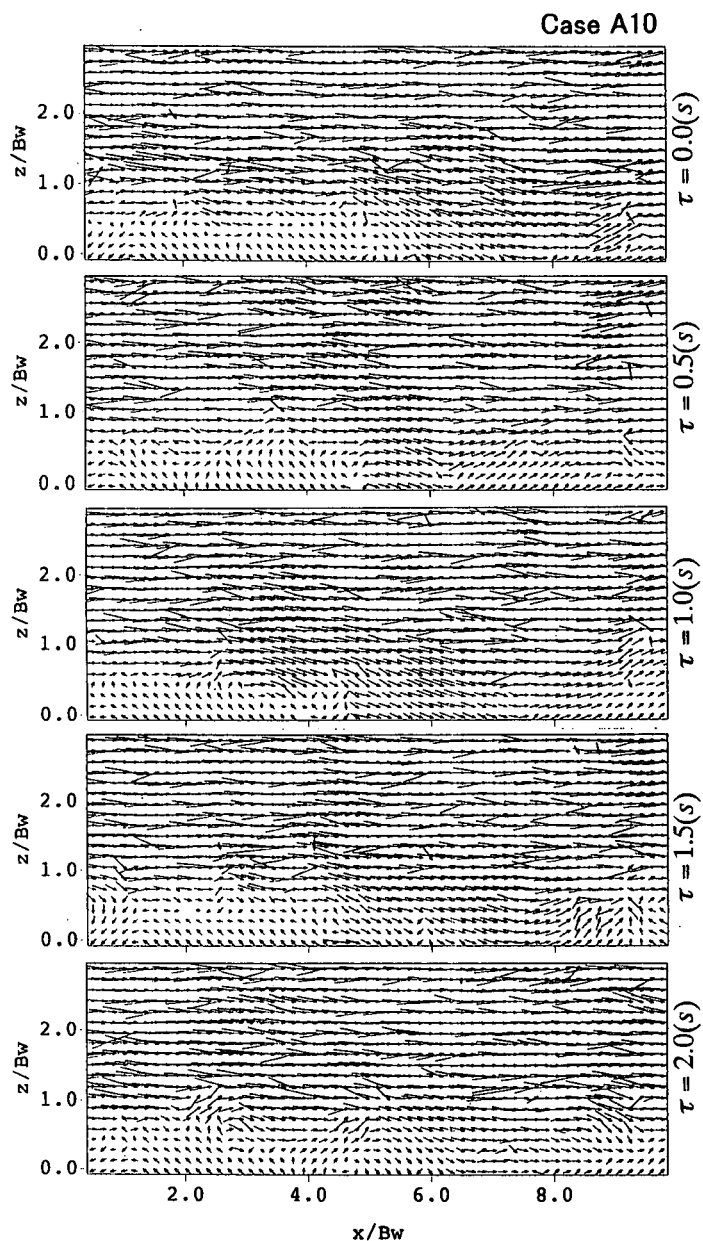


図-2(c) 瞬間流速ベクトル(caseA10)

各点の平均流速のベクトル図 ($U/U_{\max}$, $W/U_{\max}$) を示す。いずれのケースにおいてもわんど内部に循環渦の存在が確認できる。また、わんど下流端の境界において、全てのケースでわんど内部からの水はねによる剥離流が確認できる。case A03 では大規模な循環渦が確認できる。このケースの場合、剥離流はそれほど顕著ではない。case A05 では case A03 に比べてわんど内部の循環渦は引き伸ばされ、 x 軸を長軸とした楕円的な渦構造を形成している。これは図-2(b)で観察されるように長軸の長さが 7~8cm 程度の循環渦が時間変化に伴って移動しているためである。このケースにおいても下流端で逆流が確認できる。また、顕著な剥離流も確認できる。case A10 の特徴は循環渦がわんどの下流端まで届いていないことである。わんど内部の $x/B_w = 5.0$ 以降の領域では一様に下流に向かう流れが観察される。この流れは $x/B_w = 5.0$ 付近からわんど

内部に入り込みわんど下流端で再び主流部へ剥離流として流れ出ていく。 $z/B_w = 0.1$ の列で順流と逆流の占有率を内挿近似により求めると、再付着点の時間平均値は $x/B_w \approx 5.0$ となり、開水路ステップ流の再付着点距離とほぼ一致する。⁴⁾

図-4(a)、(b)に境界部 ($z/B_w = 1.0$) における $U/U_{\max}$ および $W/U_{\max}$ の流下方向変化を示す。 $U/U_{\max}$ の値に関して、case A03 と case A05 がほぼ同じ値で分布しているのに対し、case A10 だけ若干大きな値を示している。これは case A10 では下流端まで循環渦が到達しないために、上流端からの剥離渦と干渉することによる流速の低減が起らないためと推測される。

次に、 $W/U_{\max}$ の分布については、case A05 がゼロ付近で平坦な分布になっており、それを挟んで case A03 が上に凸、case A10 が下に凸に分布している。こ

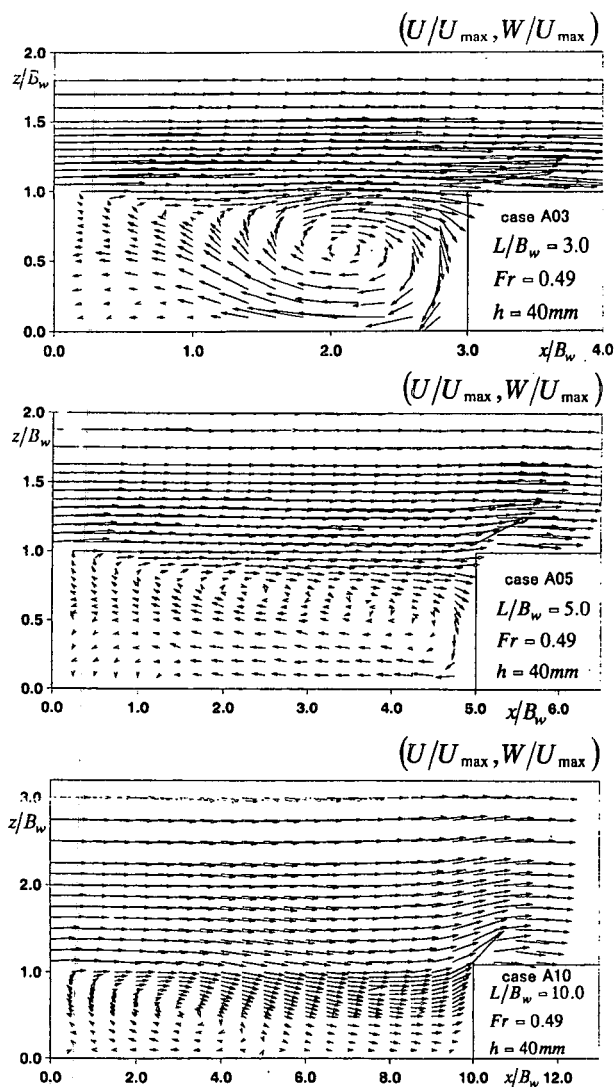


図3 平均ベクトル

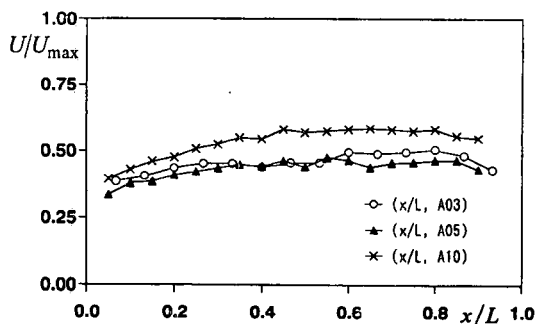


図4(a) 主流速の流下方向変化

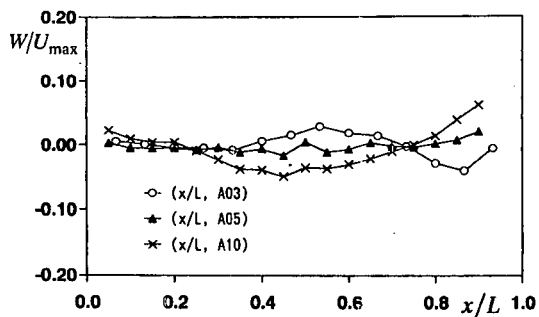


図4(b) 横断方向流速の流下方向変化

れはcase A05 が渦の数やその中心の位置を周期的に変化させているのに対し、case A03 ではわんど内の下流部、case A10 では上流部に定常的に循環渦が存在するためであると考えられる。また、 $x/L = 0.75$ 付近でcase A03 とcase A10 の分布が入れ替わり、case A10 が最も大きな値を取ることも観察される。これより、case A10 の吹き出しが卓越していると考えられる。

3.3 レイノルズ応力の分布特性

図5 に横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_{\max}^2$ の等値線図を示す。最大値はcase A03 およびcase A05 ではほぼ同一であるが、若干case A10 では小さめの値を示している。どのケースも極大値の位置は乱れ強度の横断方向流速成分が極大値をとる位置と一致していた。その位置はcase A03 では界面のわんど中央部、case A05 ではそれよりやや下流側、case A10 では若干わんど内部に入り込んだ位置である。特に、case A10 ではわん

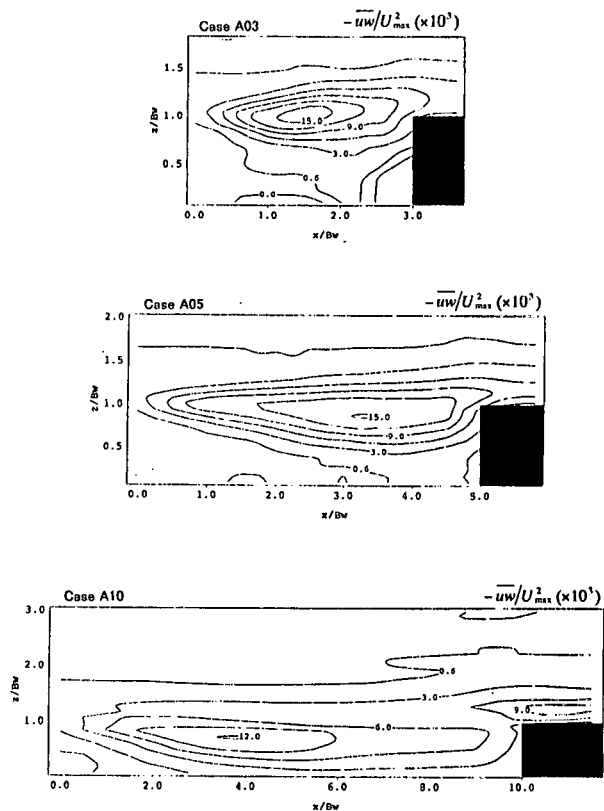


図5 横断方向レイノルズ応力の等値線

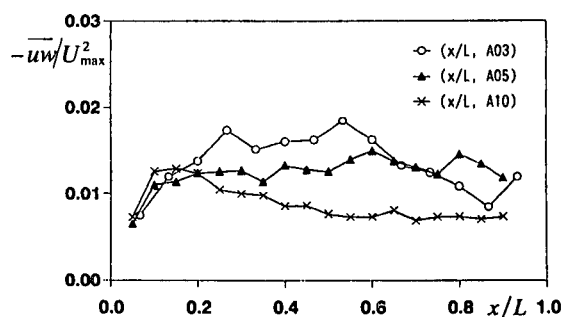


図6 境界部における横断方向レイノルズ応力の分布

どの下流にも極大値が存在している。これは caseA03 及び caseA05 では境界部で発生した渦が下流端にぶつかって剥離流が発生しているのに対し、caseA10 ではわんどの内部から主流部に吹き出す流れによってシアが発生しているためと考えられる。

図-6 に境界部 ($z/B_w = 1.0$) における横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_{\max}^2$ の分布を示す。case A03 では $x/L \approx 0.6$ まで増加し、そこから流下に伴い減少していく。この最大値を示す位置は下流部の大きなリターンフローと、上流端からの剥離渦が合体する位置と一致する。case A03 の最大値は 3 ケース中、最も大きな値である。一方、caseA05 は平坦な分布形状である。caseA10 はほぼ右下がりの分布であり、その強度は 3 ケース中最も小さい。これは、下流からのリターンフローが存在しないために caseA03 で見られたような渦の流れと主流とがぶつかる現象が起こらないためである。また、特に下流端に注目してみると case A05 の値が、3 ケース中最も大きな値となっている。これらのことから、アスペクト比が 3.0 の境界部中央付近および、アスペクト比が 5.0 の下流端で大きな運動量輸送が行われるといえる。

3.4 質量交換率と運動量交換率のアスペクト比に対する変化特性

わんど内部・主流域間の物質交換を示す指標として、わんど上下流端を結ぶラインを境界面とし、この面における質量交換率および運動量の交換率は次の式で定義される。⁹⁾

$$M = \frac{1}{\rho U_{\max} L} \int_0^L \rho \overline{W} dx \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_{\max}^2 L} \int_0^L \overline{\rho u w} dx \quad (2)$$

ここに M は質量交換率、 θ は運動量交換率である。なお、運動量交換率はわんど内部から主流域へ向かう輸送を正としている。

図-7(a)、(b)に質量交換率と運動量交換率をケース間比較した図を示す。池田ら⁹⁾の電磁流速計を用いた水制を対象とした実験結果も併示した。ただし、池田らは断面平均流速 U_m で無次元化している。質量交換率については、今回の実験では case A05 で最小の値をとり、case A10 で最大の値をとることが分かる。これは、水制を対象とした池田らの結果とはかなり異なるものの、アスペクト比が大きな範囲では質量交換率が大きくなる傾向は一致している。しかし、運動量交換率に関しては水制とわんどの違いが大きく現れている。池田らは水制間隔が広くなるほど大きな交換率を持つという結果を示しているが、今回の実験では case A05 で最も混合が激しいという結果が得られた。これは case A05 では時間平均的な横断方向の流れは小さいが、瞬

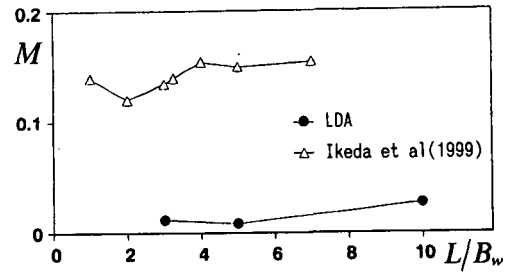


図-7(a) 質量交換率のケース間比較

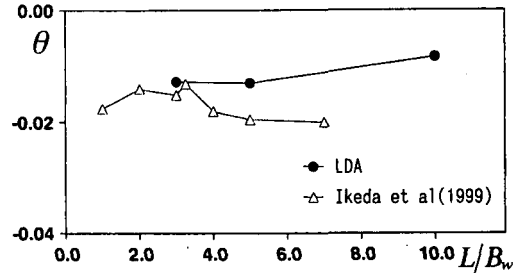


図-7(b) 運動量交換率のケース間比較

間的な横断方向流速は正負に大きく変動していることで運動量交換率が増加したものと考えられる。

3.5 スペクトル解析

時系列データから、FFT 法によりスペクトル密度関数を求めた。

図-8 に横断方向流速のスペクトル図を示す。(a) : 界面上流 ($x/L = 0.3$)、(b) : 界面下流 ($x/L = 0.8$) 図-8 (a) より、境界面上流で caseA03 および caseA05 の両ケースにおいて明確なピークが確認される。これは上流端から発生する剥離渦の周期と対応していると考えられる。ピーク値は case A03 の方が大きい。このことは主流速の場合でも同様であった。卓越周波数より卓越周期を求めると caseA03 では 0.62(s)、caseA05 では 0.95(s) である。これらは主流速のスペクトルと同一の値である。このケース間の周期の差は、下流端からのリターンフローがちょうど剥離渦の発生と共鳴する case A03 と、複雑な混合を見せる case A05 の違いが影響していると考えられる。

図-8 (b)から、境界面下流ではどちらのケースも複数のピークが確認される。このことも主流速の場合でも同様であった。上流からの剥離渦と下流端の定常渦が干渉・合体することによって現れたと考えられる。case A03 では、卓越周期は 0.62、1.14(s)で、case A05 では卓越周期は 0.95、2.17(s) である。したがって、どちらのケースでも下流では、上流での卓越周期に加えて上流のおよそ 2 倍周期が確認されることが分かる。この 2 倍の周期は、caseA03 に関しては大規模定常渦によるものと、caseA05 に関しては渦が合体し大規模な渦に変化していく過程をとらえたものと考えられる。

次に、下流側で他の 2 ケースと異なる特性を持つ case A10 に関して、再付着点近傍および水はねが生じ

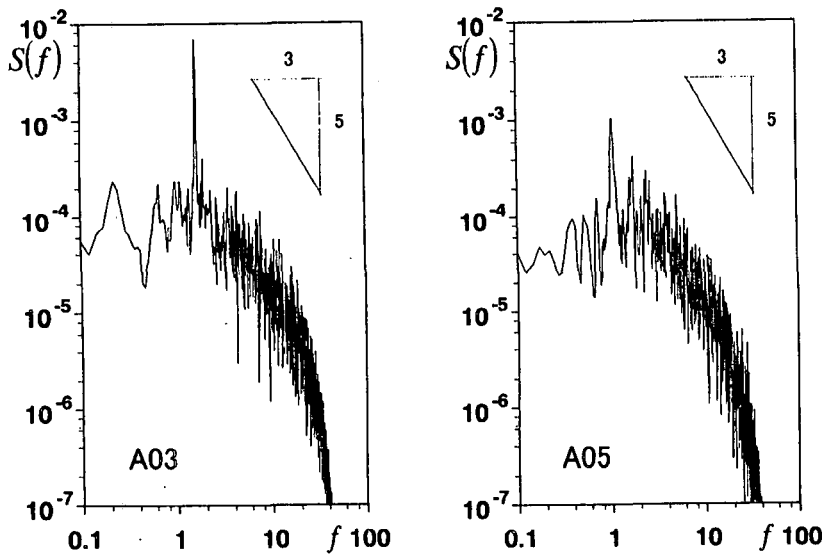


図-8(a) 横断方向流速のスペクトル密度関数 (境界面上流)

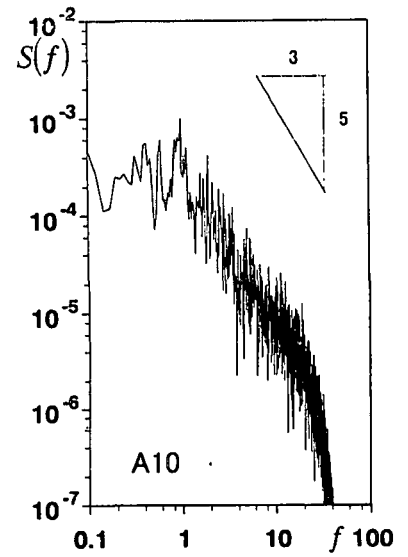


図-9(a) 主流速のスペクトル密度関数 (再付着点付近)

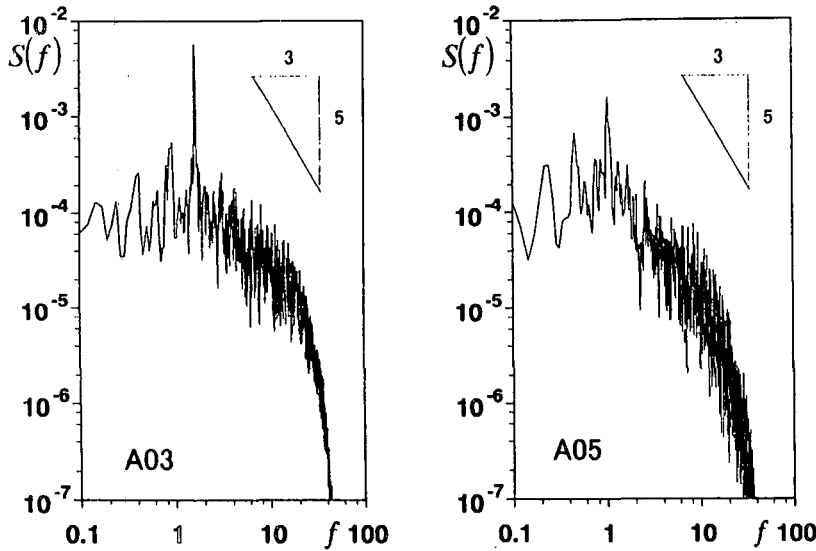


図-8(b) 横断方向流速のスペクトル密度関数 (境界面下流)

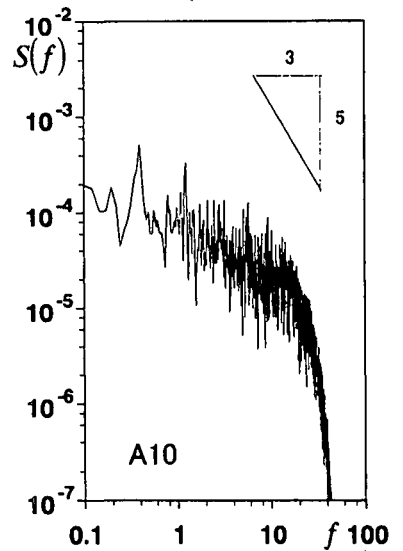


図-9(b) 横断方向流速のスペクトル密度関数 (わんどより下流)

ている領域に注目し、その周期を考察する。PIV 法により、再付着点の位置は時間経過に従って流下方向に振動していることが確認された。再付着点近傍の主流速のスペクトル密度関数を図-9(a)に、および水はねを生じている領域の横断方向流速のスペクトル密度関数を図-9(b)に示す。(a): $x/B_w = 5.0 \cdot z/B_w = 0.2$ 、(b): $x/B_w = 10.5 \cdot z/B_w = 1.63$) 図-9(a)より再付着点の振動周期は 1.02(sec)であることが示唆され、図-9(b)より水はねの生じている領域の振動周期は 2.56(sec)であることが示唆される。このことは再付着点での流れは上流端での剪断不安定から発生する小さな渦による現象であるため周期も短く、一方、水はねの生じている領域の流れの構造は再付着点より下流の領域において主流部からわんど内部に間欠的に流れ込む高運動量の流体塊が下流端に衝突する際に水はねを生じる効果による構造であるため、周期が長くなると考えられる。

3.6 発生率の分布特性

式(3)より、発生率 G を求め、等値線で表したのが図-10である。なお、 G は流入部の平均最大流速 $U_{\max}$ および流入部における水深 h を用いて無次元化しており、平均流速の微分については平滑化スプラインを用いた。

$$G = -uu \frac{\partial U}{\partial x} - uw \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) - ww \frac{\partial W}{\partial z} \quad (3)$$

ここに、今回用いた平滑化スプラインでは、データに対して 5 次式の近似曲線を適用し、諸量の流下方向、横断方向の勾配を算出した。同図から観察されるように caseA03 および caseA05 では、境界部付近で最大値を有する。一方、caseA10 では境界部よりもわんどに入った位置で最大値を有する。caseA03 および caseA05 ではわんど内に渦が存在するため剪断層は境界部に位置するが、caseA10 では主流の高運動量塊がわんど内

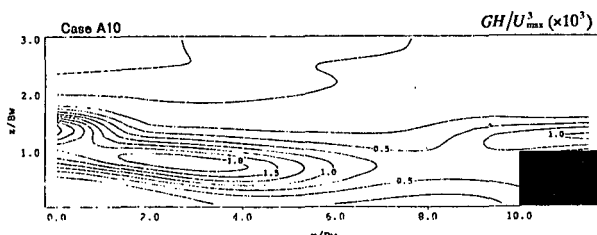
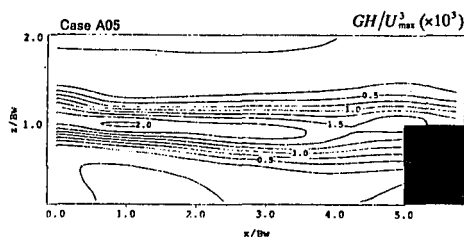
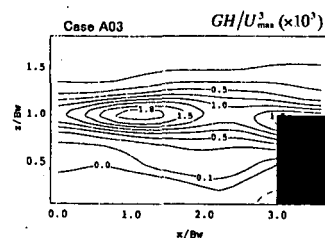


図-10 発生率の等値線

に流入するので剪断層はややわんど内部に位置するものと考えられる。

3.7 乱れエネルギーの分布特性

式(4)から乱れエネルギー k を算出し、図-11 に等値線を示した。

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + 2w'^2) \quad (4)$$

ただし、乱れ強度の鉛直方向成分は測定していないため、 $v' \approx w'$ と仮定している。

同図より、主流部とわんど内部にほぼ同様な分布形状となっている点は発生率の分布特性と傾向が一致している。さらに、どのケースも全体的な傾向として、case A03 および case A05 では、界面の中央付近で一つの極大値をとり、その位置は発生率が極大値をとる位置より若干ずれていることが観察される。また、case A10 ではわんど界面の上流端と下流端に極大値が分布しているのがわかる。この位置も若干発生率が極大値を取る位置から下流に移動していることがわかる。このことは、わんど上流端から乱れエネルギー k がピーク値をとる位置までは発生したエネルギーが散逸しきれずに蓄積していくが、それより下流では発生率よりも逸散率が大きくなるために k が減少していくと推測される。また、case A10 で水はねを生じている領域にもう一つの極大値が存在するのは、わんど内部にまで高速流体が流れ込んでいるために下流端が衝突端として作用することにより、強い水はねがおこり、乱れの発生率が逸散率よりも大きくなっているためであると推測される。

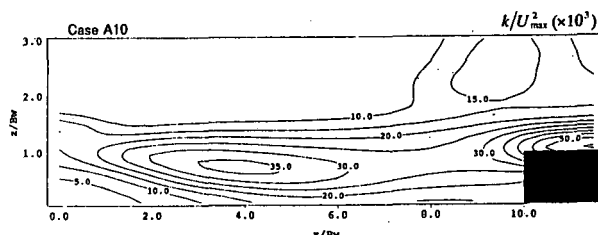
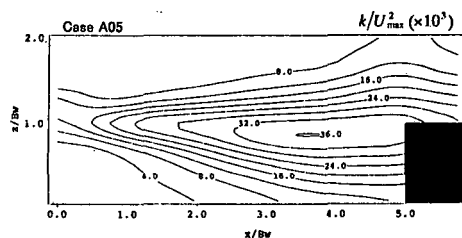
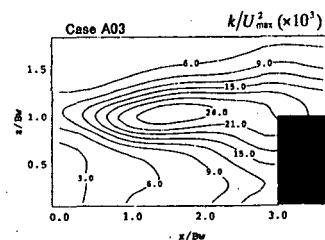


図-11 乱れエネルギーの等値線

4. おわりに

本研究では、アスペクト比の変化がわんど流れに及ぼす影響を解明するために、わんどのアスペクト比を系統的に変化させ、レーザー流速計により高精度に乱流計測を行い、その乱流構造を解明した。その結果、わんどの流れ場は図-12のように考えられる。

わんど流れがもつ特性を列挙すると①上流端からの剥離渦、②上流端での急拡、③境界面でのせん断不安定性、④下流端からのリターンフロー、⑤剥離渦とリターンフローの共鳴、⑥障害物としての下流端、⑦下流端での急縮、⑧剥離渦の再付着、⑨下流端での水はねが挙げられる。

これらの現象のうち、case A03 のもつ顕著な特性は⑤剥離渦とリターンフローの共鳴であり、全ケース中最も定常的な構造を有している。case A05 は、非定常的な流れ場であり、わんど内部で最も複雑な流れ場を形成する特徴を有していた。そしてcase A10 のもつ最も顕著な特性は、⑧剥離渦の再付着、⑨下流端での水はねであり、再付着点での現象および水はねの間欠性に大きな特徴があると考えられる。

この結果、アスペクト比変化がレイノルズ応力をはじめとする乱流特性量の分布特性に及ぼす影響が明らかになった。さらにスペクトル解析からそれぞれのアスペクト比あるいは様々な測定位置での流れの卓越周期を考察することができ、渦の干渉・合体现象を確認できた。ここで得られた高精度なデータは新たな数値

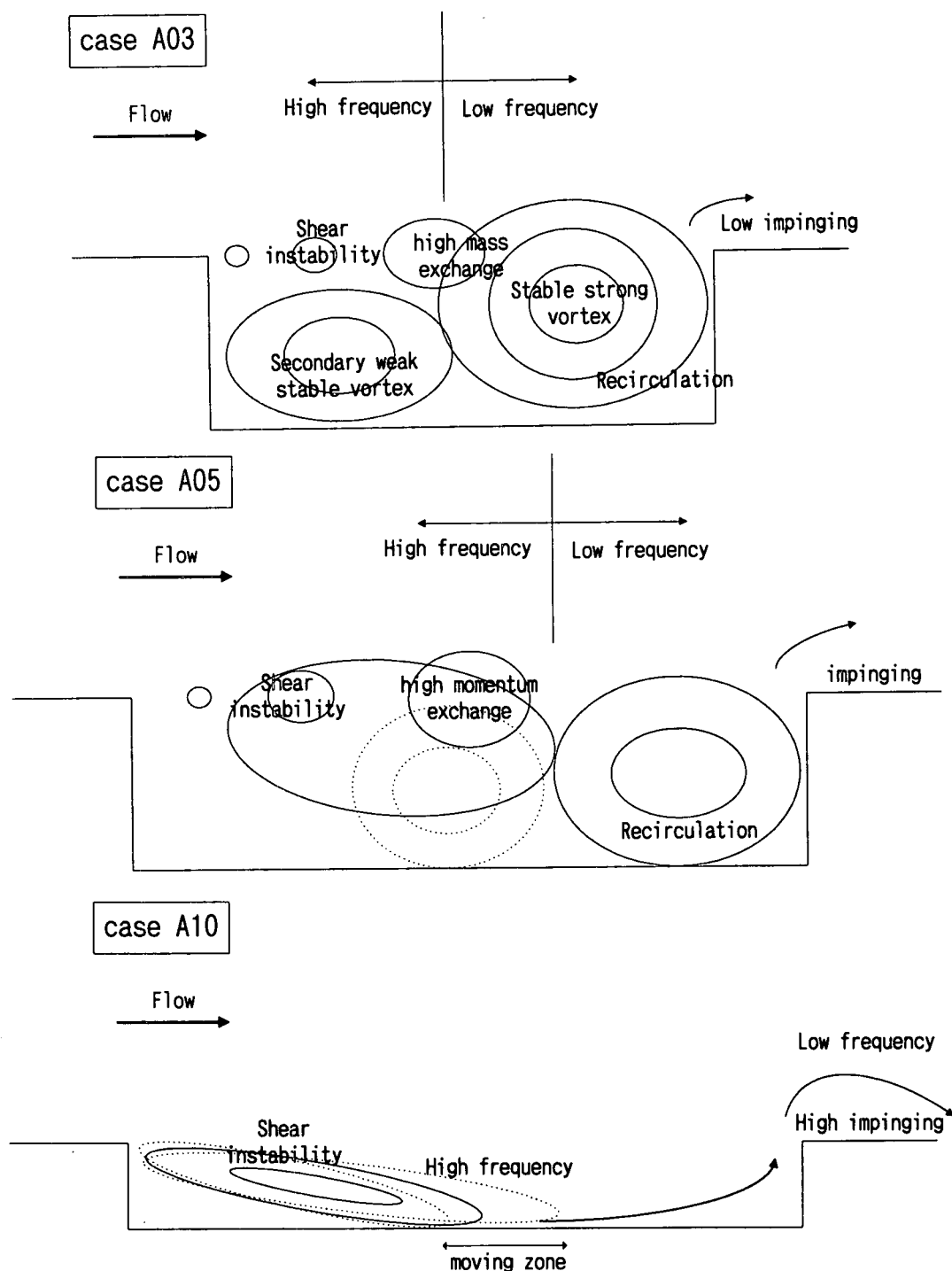


図-12 わんどの流れ場の模式図

シミュレーションの構築・検証に多大な貢献を果たすと思われる。

参考文献：

- 1) 中川研造, 川原能久, 玉井信行 : ワンド内の水理特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.595-600, 1995
- 2) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄 : 開水路流れ死水域周辺の水面変動・流体混合特性, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.711-716, 1997
- 3) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄 : 死水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1057-1062, 1998
- 4) Nezu, I. and Nakagawa, H.(1989): Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow and Coherent Vortex Shedding from Reattachment in Open-Channel Flows, Turbulent Shear Flows 6, Springer-Verlag, vol.6, pp.313-337
- 5) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高 : 不透水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.281-286, 1999

(2000 年 4 月 21 日受付)